超导电流在并联电路的分配研究

章建高

华南师范大学，广东省高等学校物质结构与相互作用基础研究卓越中心，广东省量子调控工程与材料重点实验室,物理学院,广州 510006

华南师范大学物理前沿科学研究院，粤港量子物质联合实验室，广州 510006

摘要

本实验设计了一套可测量超导体并联电路中各分支电路电流大小的装置。该装置利用霍尔效应传感器测量超导电流附近磁场大小变化来判定超导电流的强度及变化。对超导并联电路的测量结果表明，在超导态和正常态下电流分配机制是不同的。超导电流在并联电路的分配与并联支路的长度成反比。

关键词：超导电性，霍尔传感器，并联电路，铜氧化物超导体

PACS:

74.25.-q Properties of superconductors

74.72.-h Cuprate superconductors

85.30.Fg Bulk semiconductor and conductivity oscillation devices

分类号：O469

E-mail:zhangjiangao@m.scnu.edu.cn

Research on the Current Distribution Among Branches of a Superconducting Parallel Circuit

Jiangao Zhang

Guangdong Basic Research Center of Excellence for Structure and Fundamental Interactions of Matter, Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials, School of Physics, South China Normal University, Guangzhou, 510006，China

Guangdong-Hong Kong Joint Laboratory of Quantum Matter, Frontier Research Institute for Physics, South China Normal University, Guangzhou, 510006，China

Abstract

In this research a measurement device is designed capable of measuring the current distribution in branches of a superconducting parallel circuit. Hall effect sensors are used to measure changes in the magnetic field strength near the superconducting current to determine the intensity and variations of the superconducting current. The measurement results indicate that the current distribution in branch circuit is different in the superconducting state from in the normal state. In two parallel branches the distribution of current in the superconducting state is proportional to the length of the branch.

Keyword: superconductivity, hall sensor, parallel circuit, cuprate superconductors

E-mail: zhangjiangao@m.scnu.edu.cn

1 引言

自从 H K. Onnes[1] 于1911年发现超导现象以来的，超导研究一直是物理学的研究热点。在寻找新型超导体方面不断取得进展，如铜氧化物超导体[2]、铁基超导体[3]以及镍基超导体[4]陆续被发现。物理性质方面超导态表现出许多与正常态不同的新奇特性。 W.Meissner 与 R.Ochsenfeld [5]于1933年发现了超导体的完全抗磁性。 1950年 F. London [6]指出超导体中电子的行为是集体运动的表现。 L N. Cooper [7]于1956年指出超导载流子是两个电子是以库珀对的形式结合在一起。库珀对等效为玻色子，大量库珀对在低温下形成玻色-爱因斯坦凝聚，表现出集体运动的行为，因此超导电流是宏观量子现象。由 Ginzburg-Landau[8]方程可知，超导电流是分布于超导体表面的。从这些研究可以看出超导态电流与正常态电流的传输性质有很大的不同。

本研究设计了一套实验装置用来测量超导体并联电路中电流在各分支电路的分配。对铜氧化物超导材料组成的并联电路测量表明，超导电流在各并联分支的电流强度与分支电路的长度成反比。

2 实验原理

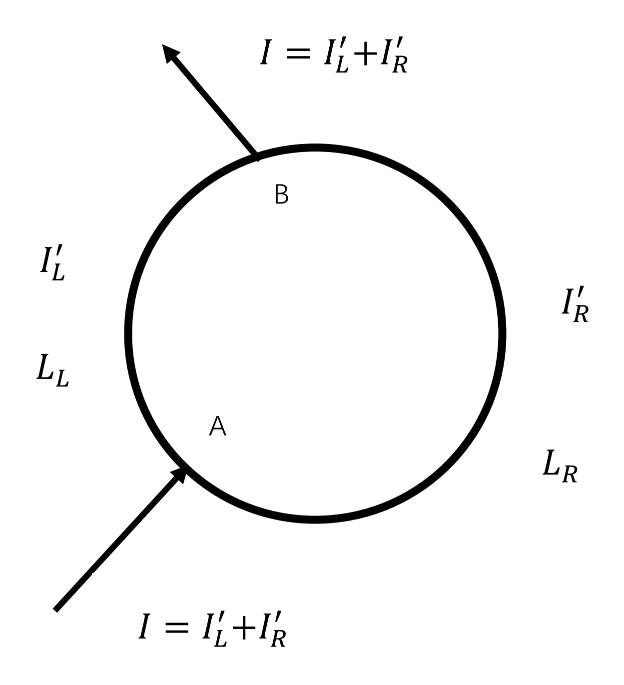


图 1. 一个环形超导体组成的电路，在 A,B 点接入电流。

Fig.1. a circle circuit composed of superconductor, electrical current is input from A and B points。

设有如图 1 的圆环形超导体，从 A、B 点接入电流。由于超导体没有电阻的概念，因此不能用正常态的规律来确定超导电流在 A、B 两侧的分配情况。从超导体的电磁理论来进行分析，假设 A、B 两侧的弧长分别为L_L 和L_R（本文下标 L 表示图形左侧的指标,R 表示右侧的指标,下同)。若有电流 I 流经超导体，假设最初始电流的分配为I_L' 和 I_R'。先看电流I_L'产生的效果， 电流I_L'将在圆形超导线圈中产生磁通量变化，按照超导体电磁理论，这将在超导线圈中激发诱导电流以抵消I_L'电流在线圈中产生的磁通量变化。该诱导电流与I_L'方向相反，电流强度为 $\frac{L_L}{L_L+L_R} * I_L'$。同理$I_R'$也将在超导线圈中产生诱导电流，方向与$I_R'$ 相反，电流强度为$\frac{L_R}{L_L+L_R} * I_R'$。 因此在线圈左侧检测

到的电流强度为 $I_L = I_L' - \frac{L_L}{L_L+L_R} * I_L' + \frac{L_R}{L_L+L_R} * I_R' = \frac{L_R}{L_L+L_R} * I$ 。同理在右侧检测到的电流为$I_R = \frac{L_L}{L_L+L_R} * I$。

由此可知，超导电流在环形线圈两侧的分配与两侧的电路长度成反比。以上推导过程仅牵涉到并联电路两分支的长度，并未考虑到电路截面的形状及截面积大小。在正常态的并联电路中，电流的分配与各分支电路的电阻有关，而电阻不仅与长度有关，还与电路的截面形状及截面积大小有关。如果以上环形电路 A、B 两侧正常态下电阻是不均匀的，则可以检测出超导态与正常态的电流分配的区别。

本实验将制作圆环形超导线圈，环形线圈各段有不同的截面积，造成电阻与长度不成比例的变化，以检测正常态与超导态电流分布的区别。

3 实验与分析

3.1 样品制备

制作 $YBa_2Cu_3O_7$ 样品，加工成如图 2 所示的形状。

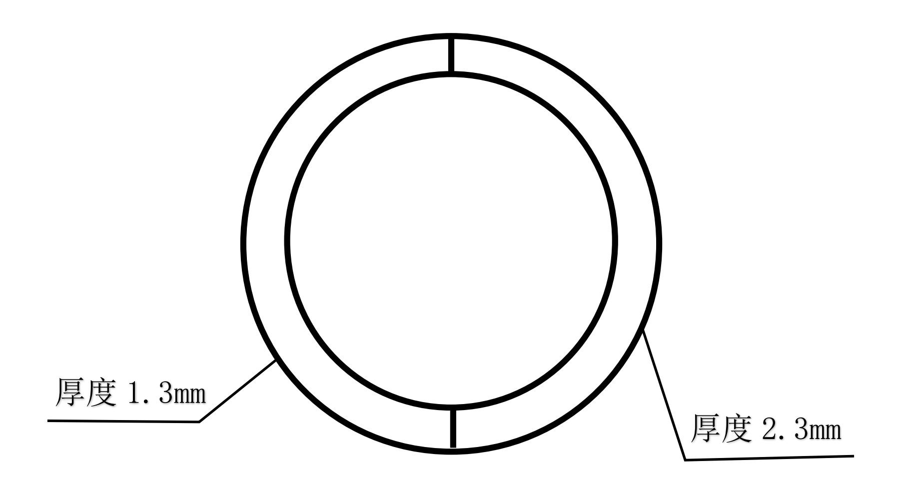


图 2. 样品的形状及尺寸，样品直径 38mm, 圆环宽 3mm，左右两侧厚度不同，长度与宽度相同。

Fig.2. Shape and size of the sample. The thickness on the left and right sides is different.

3.2 样品安装

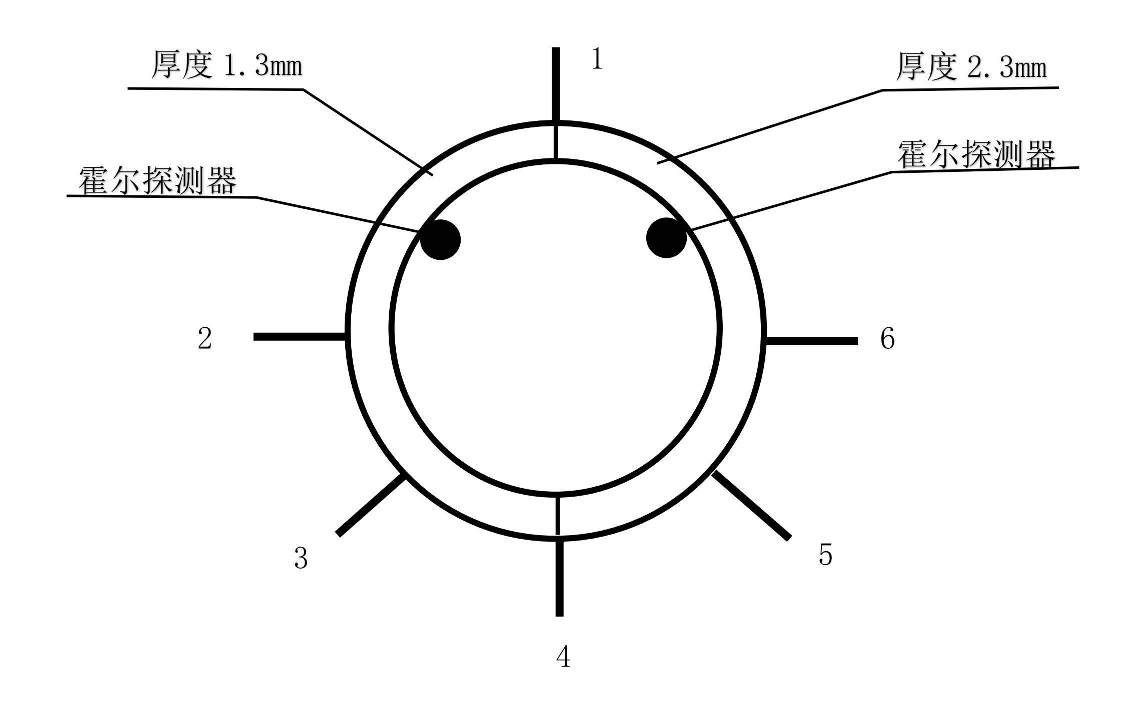


图 3 样品安装图示。电极 1，2，4，6 均匀分布于圆环四周，电极 5 安装在电极 4，6 正中间位置，电极 3 安装于电极 2，4 正中间。线圈内侧安装两个霍尔探测器， 用于检测电路中电流的变化。

Fig. 3. Sample installation diagram。

3.3 超导转变温度测量

首先测量样品的超导转变温度，将样品按图 3 装配好，电极 2 与 6 接入恒流源，调节恒流源电流为 20mA，电压表接入电极 3 与 5，这样组成一个四探针测量系统。缓慢降低样品温度，监测电极 3 与 5 间的电压变化，测量结果如图 4 所示

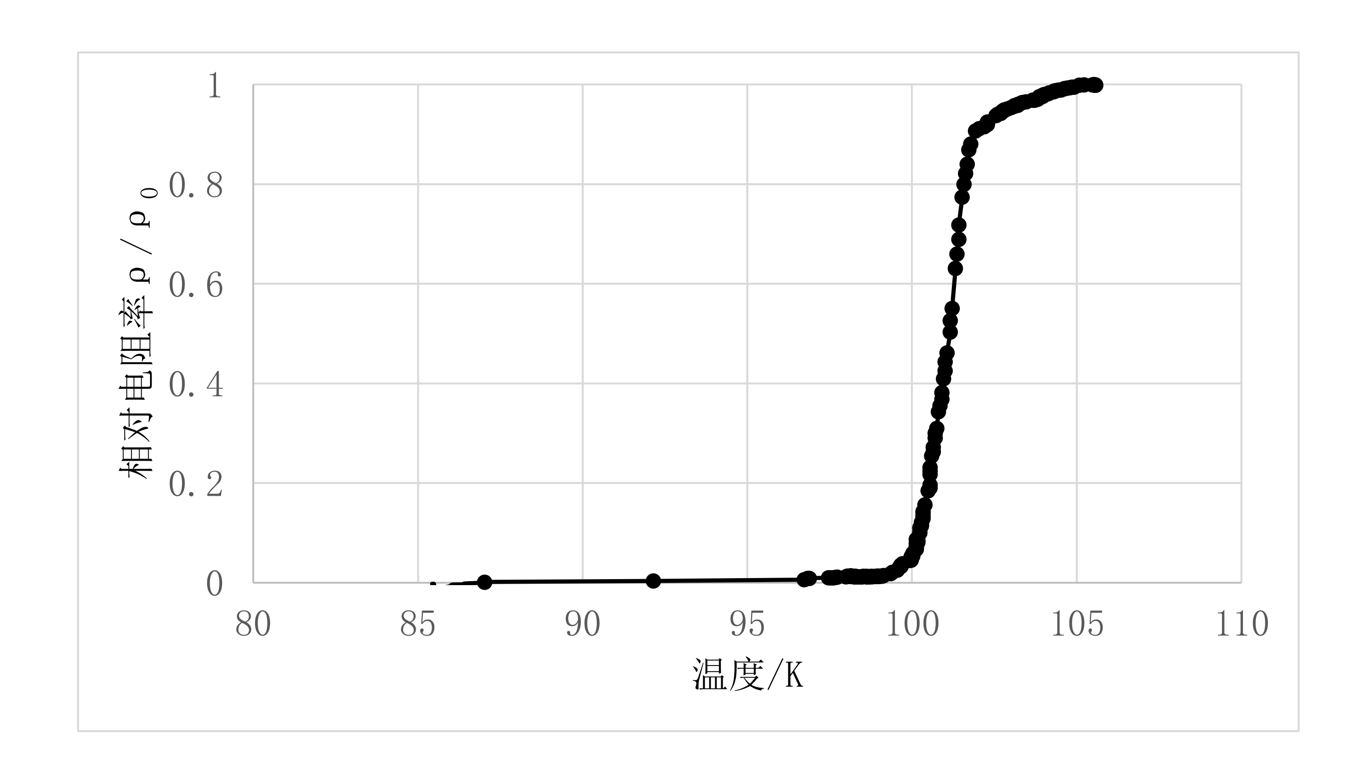


图 4. 样品电阻率随温度的变化。

Fig. 4. superconducting transition.

由图 4 可知，样品在 102K 发生超导转变，温度降低到 98K 时已完成了超导转变，达到了零电阻。

3.4 霍尔探测器定标

霍尔探测器用于测量电流产生的磁场，以磁场强弱变化来判断电流的变化。磁场强度是与相对于电流的位置有关的，所以霍尔探测器的测量是与安装位置有关的。而且霍尔探测器的测量是温度敏感的。且在极低温下，每个霍尔探测器对磁场的敏感度不同，即同样的磁场两个霍尔探测器测得的霍尔电压可能是不同的。为了消除这些因素对测量带来的误差，每次测量前都要对两个霍尔探测器进行定标，确保两个霍尔探测器的数据具有可比性。定标方法就是将电流接入电极 2 与 6，这时两个霍尔探测器测量的是相同的电流，两个霍尔电压具有可比性。后续两个霍尔

探测器的霍尔电压将通过定标结果进行调整，再进行比较。

3.5 样品测量

调节样品温度到 90.5K,此时样品处于超导状态，从电极 2，6 接入恒流源，电流强度为 100mA，对两个霍尔探测器进行定标。

然后以电极 1 为一个接入点，另一接入点分别为电极 2、3、4、5、6，接入恒流源。电流强度为 100mA，测量时通过改变电流的方向来观察霍尔电压的变化。 图 5 是一个典型的测量图形。

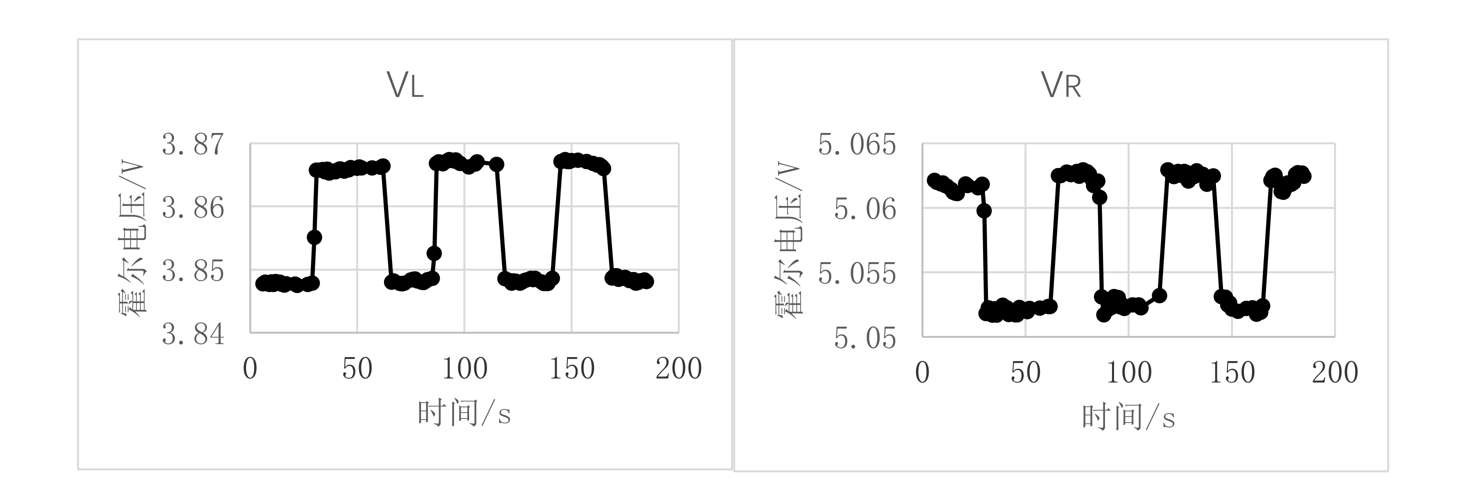


图 5 在温度为 90.5K 的情况下，100mA 的电流由电极 1 与 3 接入，改变电流方向时，左右两个霍尔探测器的霍尔电压变化。

Fig.5. A typical example of hall voltage at temperature of 90.5K.

图 5 是一个典型的测量图形，测量温度为 90.5K，此时样品处于超导状态，电流由电极 1 与 3 接入，电流强度为 100mA。这里电流强度大则会影响材料的超导性，电流小则霍尔信号变弱，100mA 的电流强度是平衡这两个因素的综合选择。改变电流方向时，左右两个霍尔探测器都显示了霍

尔电压的明显变化。

由于霍尔探测器的输出是有一个本底电压的，测量得到的霍尔电压是叠加在本底电压上的。左侧探测器的本底电压大约是 3.86V,右侧霍尔探测器的本底电压大约是 5.06V。这也表明霍尔探测器在极低温度下性能明显分化，每次测量前进行定标确定两个霍尔探测器数值关系是十分必要的。本实验的霍尔电压是指电流改变方向时霍尔探测器输出电压的变化部分，去除了本底电压。实验得到的霍尔电压数据经前面的定标数据修正后，左右两侧霍尔探测器的霍尔电压之比就表示两侧电流之比。

将温度调节到 108K，由图 4 可知，此时样品处于正常态。重复以上的定标与测量过程。为增强霍尔信号的强度，电流强度增加到 180mA。

将以上 90.5K 与 108K 时的测量数据列于表 1。

表 1.　样品的测量数据，第一栏为电流接入点。

Table 1. The data of measurement

电流接入点	I_L/I_R(90.5K)	I_L/I_R(108K)	L_R/L_L	R_R/R_L
1-2	3.59	1.98	3.00	2.13
1-3	1.83	1.20	1.67	1.09
1-4	1.05	0.61	1.00	0.56
1-5	0.62	0.35	0.60	0.37
1-6	0.34	0.20	0.30	0.22

4 结果与讨论

在表 1.的第二与第三列分别列出了在超导态与正常态的情况下，电流经不同接入点时在两侧的电流强度之比。其中接入点 1 是不变的，表中第一行各指标的下标 L 与 R 分别表示接入点 1 的左侧与右侧。表中第三列与第四列分别表示接入点 1 右侧与左侧的电路长度之比及电阻之比。这两项是根据接入点的位置与样品形状计算出来的。实际样品是手工加工的，在尺寸上存在少许误差，接入点电极的位置也存在少许误差。在整个测量过程中，各电极与霍尔探测器的位置都是固定的，电流接入点的变换是在外部接线电路中进行的。超导态与正常态的测量过程仅仅是温度发生了改变，样品与电极及霍尔探测器都没有任何变动。因此测量结果只反映了超导态与正常态的转变导致的电流分配的变化，消除了其他因素对实验结果的影响。

从表 1.可以看出，第三列接入点的变化导致的左右两侧电流之比的变化与第五列表示的右侧与左侧电路电阻之比相吻合，这与正常态下并联电路的电流分配机制是一致的。第二列是超导态下电流在各接入点改变时左右两侧电流强度之比的变化，可以看出，与第四列的电路在右侧与左侧的电路长度之比高度吻合。这说明超导电流在并联电路的分配与并联电路支路的长度成反比。这个结果与本文 **2 实验原理** 的分析一致。

5 总结

在本研究中设计了一套测量装置，可以测量电流在超导体并联电路各分支路的分配状况。

在超导体组成的并联电路中，各分支电流的强度与分支电路的长度成反比。

6 致谢

作者感谢物理教育研究所的同事们的有益探讨，感谢材料物理系的同事们给予的帮助。

7 参考文献

[1] Onnes H K. Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden.，1911，120b、122b、124c

[2] Bendnorz J G，Muller K A. Z. Phys. B-Condensed Matter，1986，64：189

[3] Kamihara Y，Watanabe T，Hirano M *et al*. J. Am. Chem. Soc.，2008，130(11)：3296

[4] Li D *et al*. Nature，2019，572：624

[5] Meissner W, Ochsenfeld R. Naturwissenschaften,1933,21:787

[6] London F. Superfliuds, Vol.1 New York:John Wiley and Sons,1950

[7] Cooper L N. Phys. Rev.,1956,104:1189

[8] Ginzburg V L and L D Landau. ЖЭТФ, 1950,20,1064